

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**



612.43234X00

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicants: L. HU, et al.

Serial No.: 10/695,899

Filed: October 30, 2003

For: METHOD FOR RAPID FORMATION OF A STOCHASTIC MODEL
REPRESENTATIVE OF A HETEROGENEOUS UNDERGROUND
RESERVOIR, CONSTRAINED BY DYNAMIC DATA

LETTER

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

February 25, 2004

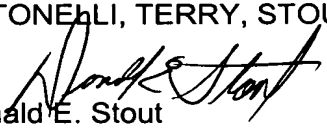
Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55, applicants hereby
claim the right of priority based on:

French Application No. 0213632 filed on October 30, 2002

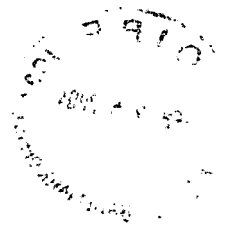
A certified copy of said French application document is attached hereto.

Respectfully submitted,
ANTONEHLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP


Donald E. Stout
Registration No. 26,422

1300 North Seventeenth Street
Suite 1800
Arlington, VA 22209
Tel.: 703-312-6600
Fax.: 703-312-6666

DES/kmh
Enclosure





BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 27 OCT. 2003

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23
www.inpi.fr



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



REQUÊTE EN DÉLIVRANCE page 1/2



Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

09 540 617 / 010801

REMISE DES PIÈCES DATE 30.10.02 LIEU 99 N° D'ENREGISTREMENT 0213632 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI 30 OCT. 2002		1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE 1 et 4 avenue de Bois Préau 92852 Rueil-Malmaison cedex	
Vos références pour ce dossier (facultatif) JC/CLN			
Confirmation d'un dépôt par télécopie		<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
2 NATURE DE LA DEMANDE		Cochez l'une des 4 cases suivantes	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
Demande de brevet initiale ou demande de certificat d'utilité initiale		N° _____ Date _____ N° _____ Date _____	
Transformation d'une demande de brevet européen Demande de brevet initiale		<input type="checkbox"/> N° _____ Date _____	
3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) METHODE POUR FORMER PLUS RAPIDEMENT UN MODELE STOCHASTIQUE REPRESENTATIF D'UN RESERVOIR HETEROGENE SOUTERRAIN, CONTRAINT PAR DES DONNEES DYNAMIQUES			
4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE		Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date _____ Pays ou organisation _____ N° _____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE	
Prénoms			
Forme juridique		Organisme Professionnel	
N° SIREN		_____	
Code APE-NAF		_____	
Domicile ou siège	Rue	1 et 4 avenue de Bois Préau	
	Code postal et ville	92852 Rueil-Malmaison cedex	
	Pays	France	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00 N° de télécopie (facultatif) 01 47 52 70 03	
Adresse électronique (facultatif)			
<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»			

Remplir impérativement la 2^{ème} page



BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE
page 2/2

BR2

REMISE DES PIÈCES DATE 30.10.02 LIEU 99 N° D'ENREGISTREMENT 0213632 NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI
Vos références pour ce dossier : (facultatif)		JC/CLN
6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)		
Nom		ELMALEH
Prénom		Alfred
Cabinet ou Société		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel		
Adresse	Rue	1 et 4 avenue de Bois Préau
	Code postal et ville	92 18 15 12 Rueil-Malmaison cedex
	Pays	France
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00
N° de télécopie (facultatif)		01 47 52 70 03
Adresse électronique (facultatif)		
7 INVENTEUR (S)		
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)
8 RAPPORT DE RECHERCHE		
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non
9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requise pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence) : AG <input type="text"/>
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		
10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Directeur - Propriété Industrielle		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI

5

La présente invention concerne une méthode pour former plus rapidement un modèle numérique stochastique de type Gaussien ou apparenté, représentatif d'un milieu hétérogène poreux (tel qu'un gisement d'hydrocarbures par exemple) calé par rapport à des données dites dynamiques caractéristiques du déplacement des fluides dans le milieu telles que par exemple des données de production (pressions obtenues à partir d'essais de puits, débits, etc.).

La méthode selon l'invention trouve des applications dans la modélisation de zones souterraines où il s'agit de générer des représentations montrant comment est distribuée une certaine grandeur physique dans une zone du sous-sol (la perméabilité notamment), compatibles au mieux avec des données observées ou mesurées, dans le but par exemple d'en favoriser l'exploitation.

ETAT DE LA TECHNIQUE

L'optimisation dans un contexte stochastique consiste à déterminer des réalisations d'un modèle stochastique qui satisfont un ensemble de données observées sur le terrain. En ingénierie de réservoir, les réalisations à identifier correspondent à des représentations, dans le champ réservoir, de la distribution de propriétés de transport telles que la perméabilité ou porosité. Ces réalisations forment des modèles numériques de réservoir. Les données disponibles sont, par exemple, des mesures ponctuelles de perméabilité ou porosité, un modèle de variabilité spatiale déterminé selon des mesures ponctuelles ou encore des données directement liées aux écoulements des fluides dans un réservoir souterrain, c'est à dire des pressions, des temps de percée, des débits, etc. Ces dernières sont souvent non linéairement reliées aux propriétés physiques à modéliser. Une réalisation tirée au hasard n'est pas en général en adéquation avec l'ensemble des données collectées.

La cohérence vis à vis des données est intégrée dans le modèle par le biais d'une procédure inverse :

- Tarantola, A., « Inverse problem theory – Methods for data fitting and model parameter estimation », Elsevier Science Publishers, 1987.

5 Pour ce faire, la technique la plus simple est celle de l'essai et de l'erreur. Cette approche consiste à tirer au hasard des réalisations jusqu'à l'obtention d'une réalisation satisfaisant aux données. Elle offre l'avantage de la conservation du modèle de variabilité spatiale, mais requiert un temps calcul prohibitif. Aussi n'est-elle que très rarement utilisée en pratique.

10 Une alternative souvent préférée prend appui sur le calcul des gradients. Les méthodes de gradients permettent de modifier une réalisation initiale suivant une direction de recherche, cette dernière étant estimée à partir des gradients. Les modifications sont apportées itérativement jusqu'à ce que le calage des données soit jugé acceptable. Les méthodes de gradients sont attrayantes de par leur efficacité. Néanmoins, elles deviennent
15 inadaptées dès lors que le nombre de paramètres, c'est-à-dire le nombre de valeurs de perméabilité et de porosité constituant le modèle numérique, est important. En outre, elles ne permettent pas de modifier les réalisations en respectant la structure spatiale du modèle stochastique.

20 Plus récemment, une technique de paramétrage géostatistique, a été introduite pour contraindre, par déformation graduelle, les réalisations stochastiques à des données dont elles dépendent de manière non linéaire. Elle a fait l'objet des brevets FR 2.780.798 et FR2.795.841 du demandeur, et des publications suivantes, notamment :

- Hu, L.Y., 2000, Gradual deformation and iterative calibration of Gaussian-related stochastic models: Math. Geology, Vol.32, No.1.
- 25 - Le Ravalec, M. et al. 2000, The FFT moving average (FFT-MA) generator: An efficient numerical method for generating and conditioning Gaussian simulations: Math. Geology, Vol.32, No.6.
- Hu, L.Y., Blanc, G. and Noetinger, B. (2001): Gradual deformation and iterative calibration of sequential stochastic simulations. Math. Geology, Vol. 33, No.4.

Cette méthode a été appliquée avec succès à divers cas notamment à partir de données provenant de champs d'exploitation pétrolière, comme décrit dans les documents suivants :

- Roggero, F. et al. 1998, Gradual deformation of continuous geostatistical models for history matching, Paper SPE 49004: Proc. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans.
- Hu, L.Y. et al. 1998, Constraining a reservoir facies model to dynamic data using a gradual deformation method, Paper B-01: Proc. 6th European Conference on Mathematics of Oil Recovery (ECMOR VI), 8-11 September 1998, Peebles, Scotland.

Comme on va le rappeler plus en détail ci-après, la méthode de déformation graduelle permet de modifier graduellement une réalisation d'un modèle stochastique de type Gaussien ou de type apparenté au modèle Gaussien tout en respectant la structure spatiale du modèle.

Optimisation stochastique

Soit $f^{obs} = (f_1^{obs}, f_2^{obs}, \dots, f_M^{obs})$ l'ensemble des données sur le terrain et $f = (f_1, f_2, \dots, f_M)$ les réponses correspondantes simulées pour une réalisation z d'un modèle stochastique Z donné. En général, les réponses $f = (f_1, f_2, \dots, f_M)$ sont obtenues en résolvant numériquement le problème direct. Ainsi, si z représente un champ de perméabilité, les données f peuvent être des mesures de pression. Dans ce cas, elles sont simulées à partir d'un simulateur d'écoulement. L'objectif d'une optimisation stochastique est de produire des réalisations de Z qui réduisent les différences entre les données observées et les réponses correspondantes simulées numériquement. Ces différences sont mesurées par la fonction objectif suivante :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \omega_m (f_m - f_m^{obs})^2$$

Les coefficients ω_m sont des poids attribués aux données f_m^{obs} . Les f_m sont des fonctions de la réalisation z . En ce sens, la minimisation de la fonction objectif est un problème à plusieurs variables.

Soit N le nombre de mailles ou de composantes formant la réalisation z . N est souvent très grand ($10^4 \sim 10^7$). Il est donc très difficile de mener une optimisation directement par rapport aux composantes de z . De plus, la réalisation z , même modifiée, doit rester une réalisation de Z . La méthode de déformation graduelle permet de
 5 s'affranchir de ces difficultés.

Recherche aléatoire à partir de la méthode de déformation graduelle

On considère à présent un champ aléatoire Z qui peut être transformé en champ aléatoire Gaussien Y . La technique de déformation graduelle permet de construire une chaîne continue de réalisations en combinant une réalisation initiale y_0 de Y avec une autre
 10 réalisation u_1 , dite complémentaire, de Y , u_1 étant indépendante de y_0 (figure 1a). Les coefficients de combinaison sont par exemple $\cos(t)$ et $\sin(t)$ et la réalisation combinée vérifie la relation :

$$y(t) = y_0 \cos t + u_1 \sin t$$

où t est le paramètre de déformation.

15 Une autre technique de construction de chaînes de réalisations consiste à combiner la réalisation initiale avec non pas une, mais P réalisations complémentaires u_p ($p=1, P$) de Y (figure 1b). Les coefficients de la combinaison sont tels que la somme de leurs carrés est égale à 1.

Dès lors que la chaîne est élaborée, on peut l'explorer en variant le paramètre de
 20 déformation t et tenter d'identifier parmi toutes les réalisations de cette chaîne celle qui minimise la fonction objectif. Cette minimisation se fait par rapport à t . Le paramétrage suivant la méthode de déformation graduelle permet de réduire le nombre de dimensions du problème de N à 1, où N est le nombre de valeurs constituant le champ à contraindre. De plus, la somme des coefficients de combinaison au carré étant 1, la réalisation
 25 optimisée $y(t_{opt})$ est encore une réalisation de Y : elle suit le même modèle de variabilité spatiale que toutes les réalisations de Y .

Cependant, si l'on restreint l'exploration de l'espace des réalisations à une unique chaîne, on limite sévèrement nos possibilités de diminuer suffisamment la fonction objectif. Il faut donc répéter la procédure décrite ci-dessus, mais avec de nouvelles chaînes
 30 de réalisations. Ces chaînes de réalisations sont construites successivement en combinant

une réalisation initiale qui est ici la réalisation optimale déterminée à l'itération précédente, avec une réalisation complémentaire de Y , à chaque fois tirée au hasard. Ainsi, à l'itération l , la chaîne continue de réalisation s'écrit :

$$y_l(t) = y_{l-1} \cos t + u_l \sin t .$$

5 y_{l-1} est la réalisation optimale définie à l'itération $l-1$ et les u_l sont des réalisations indépendantes de Y . Ces dernières sont aussi indépendantes de y_0 . Cette formulation implique que la chaîne de réalisations correspond à une hyper ellipse de dimension N .

En minimisant la fonction objectif par rapport à t , on améliore, ou au moins préserve, le calage des données à chaque fois qu'une nouvelle chaîne de réalisations est explorée. Cette procédure de recherche de minimum itérative est poursuivie tant que le
10 calage des données n'est pas satisfaisant. Le côté aléatoire de la méthode tient au fait qu'à chaque itération, la réalisation complémentaire est tirée au hasard. De fait, la direction de recherche dans laquelle on part depuis la réalisation optimisée à l'étape précédente est aléatoire. En effet, la direction de recherche, pour une chaîne donnée et à partir de la
15 réalisation optimale définie précédemment, est :

$$\begin{aligned} \left. \frac{dy_l(t)}{dt} \right|_0 &= -y_{l-1} \sin 0 + u_l \cos 0 \\ &= u_l \end{aligned}$$

Cette direction de recherche dépend uniquement de u_l . De plus, u_l étant indépendante des réalisations complémentaires déjà générées u_1, u_2, \dots, u_{l-1} et aussi de y_0 , la direction de recherche au départ de chaque nouvelle chaîne est orthogonale à la tangente
20 définie pour la chaîne précédente au même point (figure 2). Bien qu'il puisse paraître adéquat de sélectionner une direction de recherche orthogonale à cette tangente, il existe une infinité de directions orthogonales possibles.

L'expérience montre que, après quelques itérations, les nouvelles directions de recherche ne contribuent plus significativement à la décroissance de la fonction objectif
25 (figure 6).

Il a été envisagé aussi de combiner la réalisation initiale non pas à une, mais à plusieurs réalisations complémentaires. Dans ce cas, le nombre de paramètres de déformation augmente : il égale le nombre de réalisations complémentaires mises en jeu

lors d'une combinaison graduelle. Bien que le processus d'optimisation soit alors plus flexible, il faut pouvoir gérer plusieurs paramètres ce qui n'est pas forcément évident. Par ailleurs, un tel processus n'est pas nécessairement plus efficace, car il peut dépendre de l'exécution d'un plus grand nombre de simulations directes d'écoulement.

5 **La méthode selon l'invention**

La méthode selon l'invention permet de former plus rapidement un modèle numérique représentatif de la distribution d'une grandeur physique dans un milieu hétérogène poreux, tel qu'une zone souterraine (réservoirs pétroliers, aquifères, etc.), contraint par des données collectées dans le milieu (données dynamiques caractéristiques
10 du déplacement des fluides dans le milieu, collectées par des mesures (dans des puits de production, d'injection ou d'observation par exemple) ou des observations préalables.

Elle comporte un processus itératif de déformation graduelle où l'on combine linéairement à une réalisation initiale d'une partie au moins du modèle choisi du milieu, au moins une deuxième réalisation indépendante de la réalisation initiale, les coefficients de
15 cette combinaison linéaire étant tels que la somme de leurs carrés est égale à 1, et l'on minimise une fonction objectif mesurant l'écart entre un jeu de données non linéaires déduites de la dite combinaison au moyen d'un simulateur du milieu, et les dites données géologiques et dynamiques par ajustement des coefficients de la combinaison, le processus itératif étant répété jusqu'à obtenir une réalisation optimale du modèle stochastique.

20 La méthode est caractérisée en ce que l'on accélère la vitesse de déformation graduelle vers le modèle optimal représentatif du milieu, en sélectionnant comme deuxième réalisation à combiner avec la réalisation initiale, au moins une réalisation composite obtenue en sélectionnant au préalable une direction de descente définie en fonction des gradients de la fonction objectif par rapport à toutes les composantes de la dite
25 réalisation initiale.

On obtient la réalisation composite par exemple par combinaison linéaire d'un jeu de réalisations indépendantes du modèle, les coefficients de la combinaison étant calculés de façon que la direction de descente à partir de la réalisation initiale y soit le plus proche possible de celle définie par les gradients de la fonction objectif par rapport à toutes les
30 composantes de la réalisation initiale.

On conduit l'optimisation par exemple à partir d'un paramètre de déformation, qui contrôle la combinaison entre la réalisation initiale et la réalisation composite.

Dans le cas où la dite combinaison n'affecte qu'une partie de la réalisation initiale, on applique le processus itératif de déformation graduelle à un bruit blanc Gaussien utilisé pour générer une réalisation gaussienne et on détermine les dérivées de la fonction objectif par rapport aux composantes du bruit blanc Gaussien.

Suivant un mode de mise en œuvre, on combine la réalisation initiale avec un certain nombre M de réalisations composites, toutes obtenues par composition à partir de P_m réalisations indépendantes de Y , l'optimisation faisant intervenir M paramètres.

En d'autres termes, la méthode comprend essentiellement un nouveau schéma de combinaison graduelle qui tient compte de l'information apportée par les gradients au point initial de toute chaîne de réalisations. Pour construire une chaîne, on part toujours d'une réalisation de départ et d'un ensemble de réalisations complémentaires, toutes indépendantes et issues du même modèle stochastique. Par contre, on ne combine pas directement la réalisation de départ avec les réalisations complémentaires. Les réalisations complémentaires offrent la possibilité d'explorer l'espace des réalisations dans des directions différentes. Ces directions ne sont pas équivalentes : certaines permettent de se diriger davantage vers l'optimum. A ce stade, on élabore une réalisation, dite composite, en combinant les réalisations complémentaires uniquement. Puis, on crée une chaîne de réalisations à partir de la réalisation de départ (initiale) et de cette réalisation composite. Cette chaîne, comme celle qui était proposée dans le cas de base de la déformation graduelle, peut être explorée à l'aide d'un seul paramètre de déformation.

La réalisation composite est construite de façon à proposer une direction de recherche le long de la chaîne aussi proche que possible de la direction de descente donnée par les gradients. Comme mentionné plus haut, toutes les réalisations complémentaires ne sont pas équivalentes : la réalisation composite prend le meilleur de chaque réalisation complémentaire.

La méthode permet d'arriver plus rapidement à la formation du modèle numérique représentatif du milieu.

Présentation des figures

D'autres caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention apparaîtront plus précisément à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif d'application, en se référant aux dessins annexés où :

- 5 - les figures 1a, 1b montrent des schémas de déformation graduelle (dits GDM) déjà connus ;
- la figure 1c montre le schéma de déformation graduelle (dit GBC) correspondant à la méthode selon l'invention ;
- la figure 2 représente des chaînes de réalisations dans un espace euclidien à N dimensions, où la tangente au niveau de la réalisation optimisée pour une chaîne de
10 réalisations $l-1$ (RC_{l-1}) est orthogonale à la direction de recherche pour la réalisation de départ de la chaîne de réalisations suivante l (RC_l);
- la figure 3 montre la projection de la direction de descente v dans le sous-espace U défini par la base orthonormale formée par P réalisations indépendantes (u_1, \dots, u_p) ;
- 15 - les figures 4A à 4C montrent des exemples de distributions de perméabilité respectivement pour les réalisations de référence, initiale et contrainte aux données de pression;
- les figure 5A à 5E montrent respectivement les variations en fonction du temps des pressions simulées respectivement aux cinq puits (BHP-OBS1, BHP-OBS2, BHP-
20 PRO1, BHP-OBS3, BHP-OBS4) des figures 4, respectivement pour les distributions de perméabilité de référence (data), initiale et contrainte (match) ; et
- la figure 6 montre l'évolution (OF) de la fonction objectif en fonction du nombre k de simulation d'écoulement exécutées, GDM1 correspondant à une optimisation menée en combinant une réalisation de départ et une seule réalisation complémentaire,
25 GDMGBC3, à une optimisation menée en combinant la réalisation de départ et une réalisation composite construite à partir de trois réalisations complémentaires, GDMGBC10, à l'optimisation menée en combinant la réalisation de départ et une réalisation composite construite à partir de dix réalisations complémentaires, et

GDMGBC30, à une optimisation menée en combinant la réalisation de départ et une réalisation composite construite à partir de trente réalisations complémentaires.

Description détaillée de la méthode

La méthode selon l'invention permet d'orienter à chaque itération la construction
 5 de la chaîne de réalisations afin d'atteindre une direction de recherche souhaitable. La technique retenue tire avantage de l'information apportée par la direction de descente définie par les gradients de la fonction objectif J . Elle peut être mise en œuvre au moyen d'un simulateur numérique d'un type connu des gens de l'art tel que les simulateurs ATHOS ou ECLIPSE.

10 Recherche orientée par la direction de descente

On considère à ce stade la direction de descente (évolution vers une valeur minimale qu'elle soit ou non locale) définie par les gradients de la fonction objectif J par rapport à toutes les composantes de la réalisation z . Ces gradients se déduisent des coefficients de sensibilité $\partial f_m / \partial z_n$:

$$15 \quad \frac{\partial J}{\partial z_n} = \sum_{m=1}^M \omega_m (f_m - f_m^{obs}) \frac{\partial f_m}{\partial z_n}$$

Le problème du calcul des coefficients de sensibilité a été largement abordé dans la littérature scientifique. On pourra, par exemple, consulter :

- Sun, N.Z., Inverse problems in groundwater modelling, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, 1994.

20 En particulier, la technique de l'état adjoint permet de calculer l'ensemble de ces coefficients en résolvant le problème direct et son problème adjoint, dans un temps équivalent à deux fois celui requis pour la résolution du problème direct.

Comme l'objectif est d'intégrer l'information fournie par les gradients dans la méthode de déformation graduelle, il faut se ramener à la réalisation Gaussienne qui résulte
 25 de la transformation de z . On distingue deux cas selon 1) que l'on dispose ou non de données ponctuelles de conditionnement, c'est-à-dire de mesures de z en certains points.

Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune donnée, si y est la réalisation Gaussienne obtenue en transformant z , alors :

$$\frac{\partial J}{\partial y_n} = \frac{\partial J}{\partial z_n} \frac{dz_n}{dy_n}.$$

Dans le cas contraire, on suppose que z est connu en certains points α . Ainsi la
 5 réalisation Gaussienne s , déduite de la transformation de z , est une réalisation conditionnelle de Y . Pour obtenir s , on génère une réalisation non conditionnelle y de Y et on la conditionne aux valeurs connues en α par krigeage. La réalisation conditionnelle se déduit de :

$$s = s^* + (y - y^*)$$

10 s^* et y^* sont calculées respectivement par krigeage à partir des données réelles et les données de y générées au niveau des points α . On montre alors que :

$$\frac{\partial J}{\partial y_n} = \begin{cases} \frac{\partial J}{\partial z_n} \frac{dz_n}{ds_n}, & \forall n \neq \alpha \\ 0, & \forall n = \alpha \end{cases}$$

Pour des propriétés physiques continues, dz_n / dy_n ou dz_n / ds_n se calculent à partir de la fonction anamorphose qui permet de transformer la réalisation z en réalisation
 15 Gaussienne. Lorsque les propriétés physiques considérées sont catégorielles ou discrètes, ces dérivées n'existent pas. Les techniques de gradients ne peuvent alors s'appliquer.

Ces différentes relations sont d'un intérêt direct si on se contente de pouvoir déformer globalement une réalisation. Si on souhaite par contre la déformer localement, il faut appliquer la méthode de déformation graduelle au bruit blanc Gaussien x utilisé pour
 20 générer y . Dans ce cas, une étape supplémentaire s'impose : le calcul des dérivées de la fonction objectif par rapport aux composantes du bruit blanc Gaussien.

Pour illustrer le calcul de ces dérivées, on propose de se concentrer sur le cas particulier suivant lequel la réalisation Gaussienne non conditionnelle y est obtenue à partir du générateur FFT-MA décrit dans l'article publié par Le Ravalec et al. 2000 cité plus haut.

Le principe de base de ce générateur FFT-MA (pour "FFT-Moving Average") est de transformer un bruit blanc Gaussien x en réalisation Gaussienne y corrélée à partir d'un produit de convolution :

$$y = g * x$$

- 5 La fonction g résulte de la décomposition de la fonction de covariance C telle que $C = g * g'$, où g' est la transposée de g . Les dérivées de la fonction objectif par rapport aux composantes du bruit blanc Gaussien sont :

$$\frac{\partial J}{\partial x_n} = \sum_l \frac{\partial J}{\partial y_l} \frac{\partial y_l}{\partial x_n}$$

- L'expression discrète du produit de convolution conduit à $y_l = \sum_k g_{l-k} x_k$, ce qui
10 implique $\partial y_l / \partial x_n = g_{l-n}$. Si on introduit cette formulation dans les dérivées de la fonction objectif, on montre :

$$\frac{\partial J}{\partial x_n} = \sum_l \frac{\partial J}{\partial y_l} g_{l-n} = \left(\frac{\partial J}{\partial y} * g \right)_n$$

- Cette formule exprime le fait que la dérivée de la fonction objectif par rapport au $n^{\text{ième}}$ composant du bruit blanc Gaussien est donnée par la $n^{\text{ième}}$ composante du champ
15 obtenu en convoluant toutes les dérivées de la fonction objectif par rapport aux composantes de la réalisation Gaussienne avec le kernel de la fonction de covariance. A partir du cadre mis en place pour le générateur FFT-MA, on procède comme suit pour déterminer ces dérivées.

- 1-calcul de la transformée de Fourier de $\partial J / \partial y$, ces dérivées étant fournies par
20 mise en œuvre du simulateur numérique direct ;

2-multiplication de cette transformée de Fourier avec celle de g qui est fournit par FFT-MA ;

3-calcul de la transformée de Fourier inverse du produit précédent.

Le temps requis pour le calcul de ces dérivées est négligeable : il représente un temps additionnel de 2/3 par rapport à la simulation d'une réalisation Gaussienne par FFT-MA.

Quels que soient le générateur de réalisations et le simulateur numérique direct, on suppose, dans la suite, que l'on est capable de définir une direction de descente à partir des dérivées de la fonction objectif. Si l'optimisation de la fonction objectif est menée par rapport à cette direction de descente seulement, on détruit en général la cohérence de la réalisation vis à vis du modèle de variabilité spatiale. Dans la section qui suit, on intègre l'information apportée par les dérivées de la fonction objectif dans le schéma de combinaison graduelle.

Prise en compte des dérivées de la fonction objectif dans le processus de déformation graduelle

On considère la chaîne de réalisations $y_1(t)$ construite à partir de y_0 et d'une autre réalisation u de Y (figure 1a). A présent, au lieu d'utiliser une réalisation complémentaire u telle qu'elle, on tire au hasard P réalisations complémentaires u_p ($p=1,2,\dots,P$) de Y et on substitue à u une combinaison des $u_{p=1,P}$ (figure 1c). Cette combinaison n'est pas quelconque : elle suit le mode de construction suivant :

$$u = \sum_p \lambda_p u_p \text{ avec } \sum_p \lambda_p^2 = 1 \quad (1)$$

La réalisation u résultante est une réalisation de Y et est indépendante de y_0 . D'après l'équation 1, u est aussi la direction de recherche calculée pour la chaîne $y_1(t)$ au point de départ y_0 . On propose donc de construire u de sorte que la direction u soit aussi proche que possible de la direction de descente donnée par les gradients en y_0 .

On définit au préalable l'espace V des vecteurs à N dimensions muni du produit scalaire :

$$\langle y_i, y_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_{i,n} y_{j,n} \quad \forall y_i, y_j \in V$$

$y_{i,n}$ et $y_{j,n}$ sont respectivement les $n^{\text{ièmes}}$ composantes des vecteurs y_i et y_j . Soit U un sous-espace de V défini par la base orthonormale (u_1, u_2, \dots, u_p) . La direction de

recherche dans U la plus proche de la direction de descente v est donnée par la projection de v dans U (figure 3) :

$$v_U = \sum_p \langle v, u_p \rangle u_p$$

En normalisant ce vecteur, on obtient la direction u souhaitée. Les coefficients de
5 combinaison λ de l'équation (2) sont donc :

$$\lambda_p = \langle v, u_p \rangle / \sqrt{\sum_{q=1}^P \langle v, u_q \rangle^2} \quad p = 1, P$$

La réalisation u ainsi définie est appelée réalisation composite.

On a considéré jusqu'ici la construction de chaînes de réalisations par combinaison la réalisation initiale avec une réalisation composite. Cette technique peut toutefois être
10 généralisée à la construction de chaînes faisant intervenir un certain nombre M de réalisations composites, toutes obtenues par composition à partir de P_m réalisations de Y , ces $\sum_{m=1}^M P_m$ réalisations étant indépendantes. L'optimisation fait alors intervenir M paramètres. Cette technique augmente le degré de liberté dans le processus d'optimisation, mais oblige à gérer M paramètres d'optimisation.

15 *Exemple numérique*

On construit un modèle synthétique de réservoir sur lequel on teste la méthode selon l'invention.

Le réservoir synthétique de référence est représenté sur la figure 4A. Il s'agit d'un réservoir mono-couche comprenant 51x51 mailles de 10 m d'épaisseur et de 40 m de côté.
20 La distribution de perméabilité est lognormale de moyenne 200 mD et d'écart-type 100 mD. Le logarithme du champ de perméabilité est caractérisé par un variogramme sphérique isotrope et une longueur de corrélation de 480 m. Les autres propriétés pétrophysiques sont constantes : la porosité est de 25 %, la compressibilité totale de 5.10^{-4} bar⁻¹ et la viscosité du fluide de 1 cP. Un puit de production BHP-PRO1, de rayon 7.85 cm
25 dépourvu d'effet pariétal ("skin effect") se trouve au centre du réservoir : il est entouré par quatre puits d'observation (BHP-OBS1, BHP-OBS2, BHP-OBS3, BHP-OBS4) (figures 4). Une

simulation numérique d'écoulement permet d'obtenir pour ce réservoir un jeu de données de référence comprenant les pressions aux cinq puits (figure 5).

L'objet du problème inverse est de déterminer un modèle de réservoir cohérent avec les données de pression en supposant inconnue la distribution des perméabilités. Dans ce but, on lance quatre processus d'optimisation en partant de la même réalisation de départ (figure 4B). Pour chacun de ces processus, on considère un unique paramètre d'optimisation, à savoir le paramètre de déformation. Le premier processus (GDM1) reprend le schéma de déformation graduelle classique avec la construction d'une chaîne de réalisation en utilisant la réalisation de départ et une seule réalisation complémentaire. Les trois autres processus (GDMGBC3, GDMGBC10 et GDMGBC30) illustrent l'application de la méthode selon l'invention : les chaînes sont dans ce cas élaborées avec la réalisation de départ et une réalisation composite issue de la combinaison de 3, 10 et 30 réalisations complémentaires. La réalisation composite est construite comme expliqué ci-dessus (Eq. 2) en intégrant l'information fournie par les gradients de la fonction objectif par rapport au bruit blanc Gaussien. Pour chacun des processus, on représente sur la figure 6 l'évolution de la fonction objectif (OF) en fonction du nombre k de simulation d'écoulement exécutées.

On observe qu'en utilisant les gradients et en augmentant le nombre de réalisations complémentaires, la fonction objectif diminue plus vite pour un même nombre de simulations d'écoulements.

REVENDICATIONS

1) Méthode pour former plus rapidement un modèle numérique stochastique de type Gaussien ou apparenté, représentatif de la distribution d'une grandeur physique dans un milieu hétérogène poreux, qui soit calé par rapport à des données dynamiques obtenues par des mesures effectuées dans le milieu ou des observations préalables, et caractéristiques du déplacement des fluides dans celui-ci, comportant un processus itératif de déformation graduelle où l'on combine linéairement à chaque itération, une réalisation initiale (y) d'au moins une partie du milieu, et au moins une deuxième réalisation indépendante de la réalisation initiale, les coefficients (α_i) de cette combinaison linéaire étant tels que la somme de leurs carrés est égale à 1; et l'on minimise une fonction objectif (J) mesurant l'écart entre un jeu de données non linéaires déduites de la dite combinaison au moyen d'un simulateur d'écoulement dans le milieu, et les dites données géologiques et dynamiques par ajustement des coefficients de la combinaison, le processus itératif étant répété jusqu'à obtenir une réalisation optimale du modèle stochastique, caractérisée en ce que l'on accélère la vitesse de déformation graduelle vers le modèle optimal représentatif du milieu, en sélectionnant comme deuxième réalisation à combiner avec la réalisation initiale, au moins une réalisation composite obtenue en sélectionnant au préalable une direction de descente définie en fonction des gradients de la fonction objectif par rapport à toutes les composantes de la dite réalisation initiale (y).

2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'on obtient la réalisation composite par combinaison linéaire d'un jeu de P réalisations indépendantes du modèle, les coefficients de la combinaison étant calculés de façon à ce que la direction de descente à partir de la réalisation initiale y soit le plus proche possible de celle définie par les gradients de la fonction objectif par rapport à toutes les composantes de la réalisation initiale.

3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que l'on conduit l'optimisation à partir d'un paramètre de déformation, qui contrôle la combinaison entre la réalisation initiale et la réalisation composite.

4) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que la dite combinaison n'affectant qu'une partie de la réalisation initiale, on applique le processus



itératif de déformation graduelle à un bruit blanc Gaussien utilisé pour générer une réalisation gaussienne et on détermine les dérivées de la fonction objectif par rapport aux composantes du bruit blanc Gaussien.

- 5 5) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que l'on combine la réalisation initiale avec un certain nombre M de réalisations composites, toutes obtenues par composition à partir de P_m réalisations indépendantes de Y , l'optimisation faisant intervenir M paramètres.

FIG.1

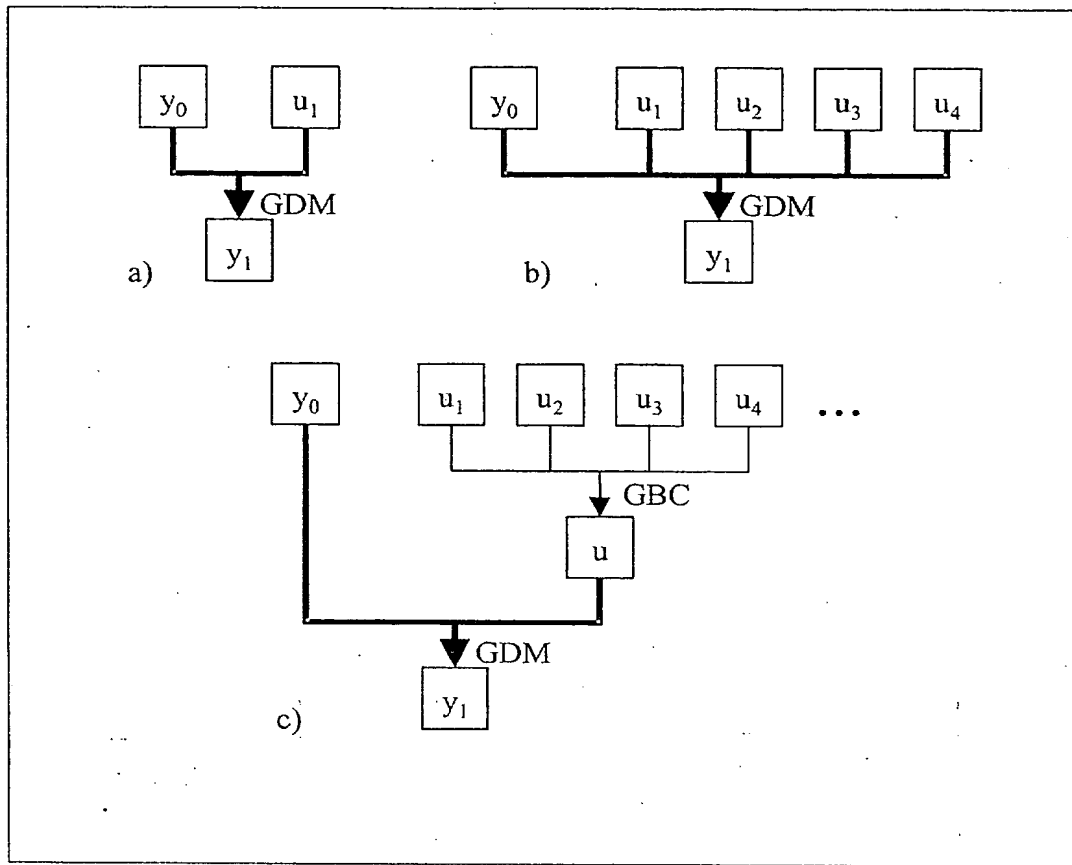


FIG.2

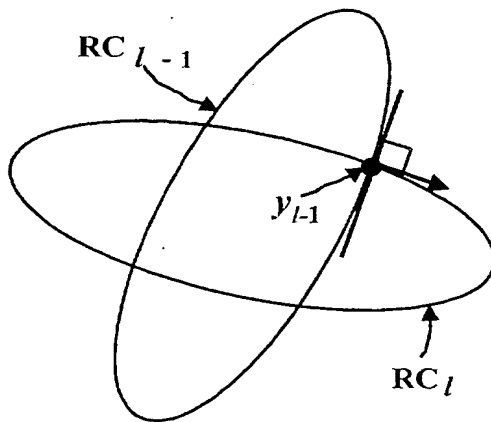


FIG.3

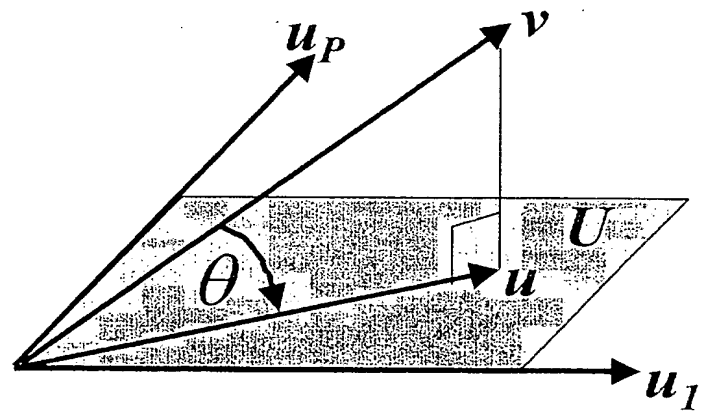


FIG.4A

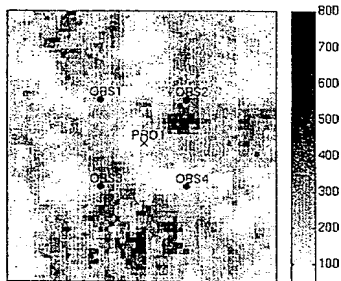


FIG.4B

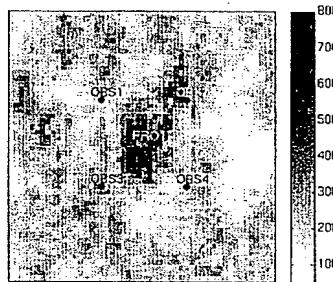


FIG.4C

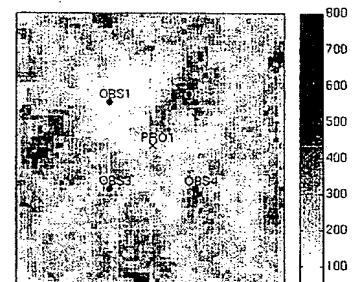


FIG.6

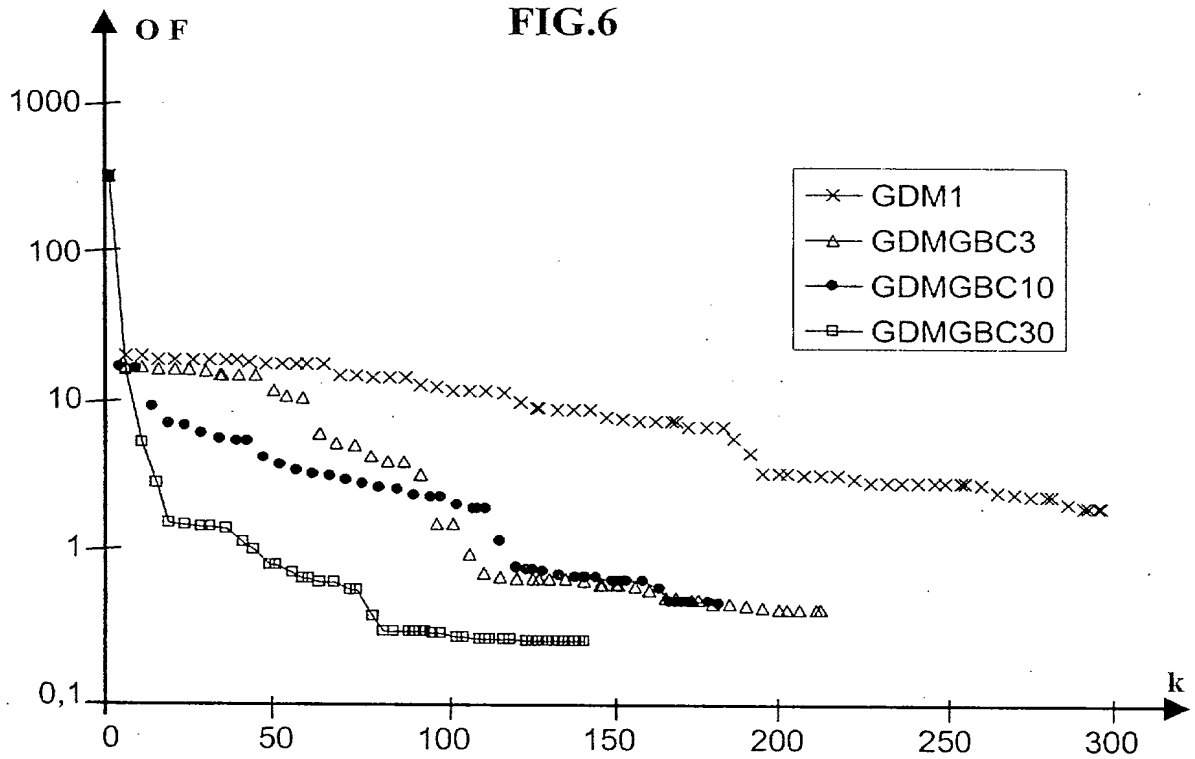


FIG.5A

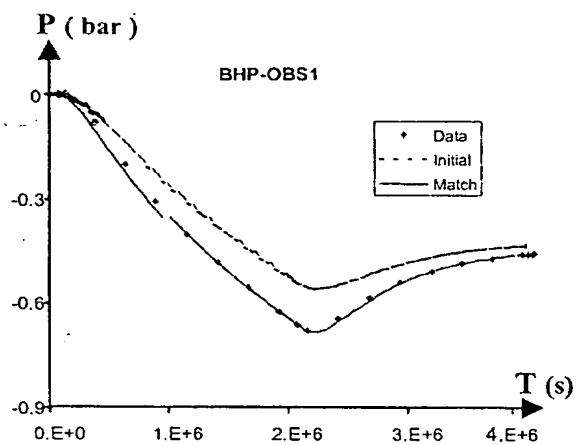


FIG.5B

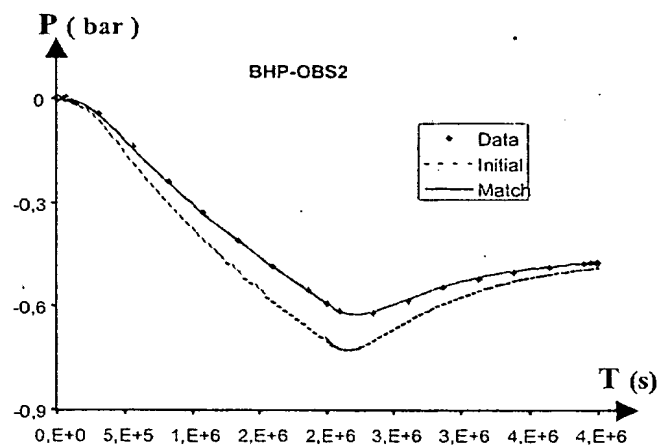


FIG.5C

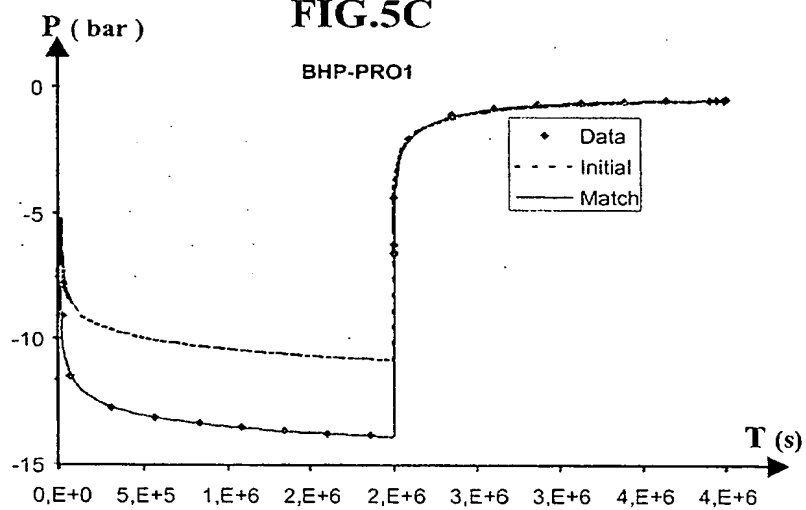


FIG.5D

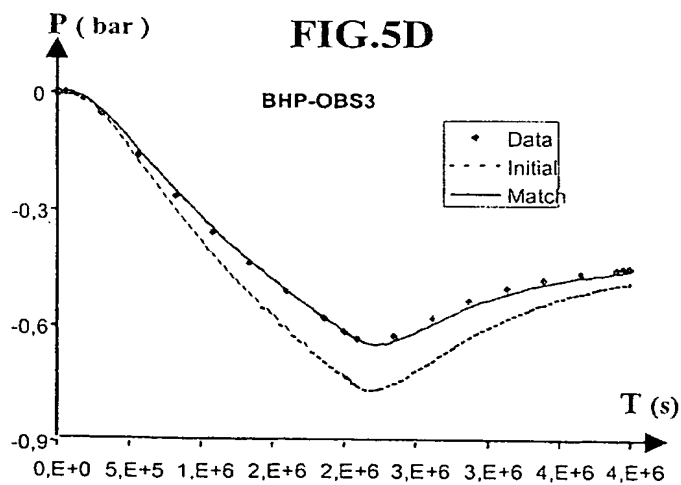
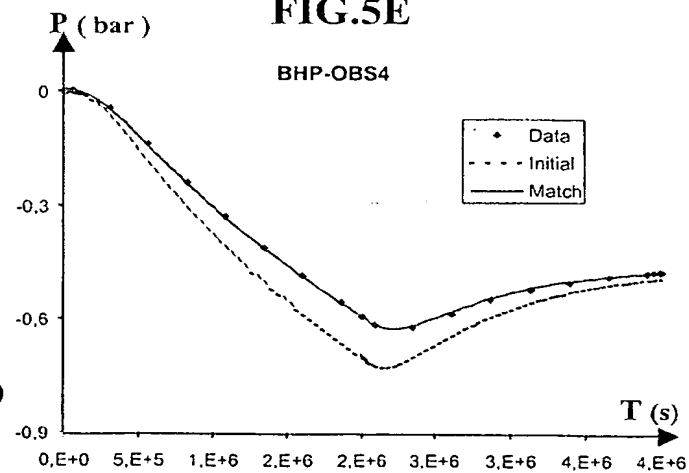


FIG.5E



**BREVET D'INVENTION****CERTIFICAT D'UTILITÉ**

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1.. / 1..(À fournir dans le cas où les demandeurs et
les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 © W / 270601

Vos références pour ce dossier (facultatif)		JC/CLN
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		0243632
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) METHODE POUR FORMER PLUS RAPIDEMENT UN MODELE STOCHASTIQUE REPRESENTATIF D'UN RESERVOIR HETEROGENE SOUTERRAIN, CONTRAINT PAR DES DONNEES DYNAMIQUES		
LE(S) DEMANDEUR(S) : INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :		
1	Nom	HU
	Prénoms	Lin-Ying
Adresse	Rue	54, rue de la Chapelle
	Code postal et ville	91250 Rueil-Malmaison
Société d'appartenance (facultatif)		
2	Nom	LE RAVALEC-DUPIN
	Prénoms	Mickaële
Adresse	Rue	16, rue des Frères Lumière
	Code postal et ville	91250 Rueil-Malmaison
Société d'appartenance (facultatif)		
3	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Directeur - Propriété Industrielle		